

06

## Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5–4.8 $\mu\text{m}$ на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ , работающие при комнатной температуре

© Д.А. Старостенко, В.В. Шерстнев, П.А. Алексеев, И.А. Андреев,  
Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, О.Ю. Серебренникова,  
Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“  
E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2011 г.

Созданы фотодиоды на основе гетероструктур  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$  с фоточувствительной площадкой  $0.45 \times 0.45 \text{ mm}^2$  и граничной длиной волны  $4.9 \mu\text{m}$ , работающие при комнатной температуре. Отличительной особенностью фотодиодов является расширенный диапазон спектральной чувствительности ( $\lambda = 1.5 - 4.8 \mu\text{m}$ ) с токовой монохроматической чувствительностью  $0.5 - 0.8 \text{ A/W}$  и плотностью обратных темновых токов  $1.0 - 1.5 \text{ A/cm}^2$  при напряжении обратного смещения  $0.2 \text{ V}$ . Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигает величины  $20 - 100 \Omega$ , обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности составляет  $(1 - 2) \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Фотодиоды для спектрального диапазона  $2 - 5 \mu\text{m}$  могут использоваться для задач экологического мониторинга, газового анализа, для контроля продуктов горения и взрыва, для анализа продуктов питания и биологических объектов, в датчиках для измерения температуры, в системах слежения специального применения, в медицине [1–3]. По мере развития производства экологический мониторинг становится одним из важнейших направлений охраны окружающей среды. Такая проблема включает в себя различные задачи спектрального анализа атмосферы в диапазоне длин волн  $2 - 5 \mu\text{m}$ , в котором существует множество линий поглощения воды, промышленных газов и других

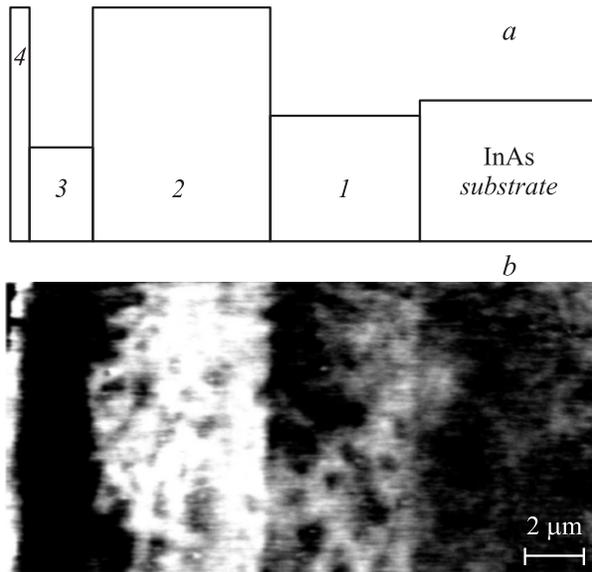
веществ, вредных для организма человека. Например, в среднем ИК диапазоне находятся линии поглощения таких газов, как этилен, метан, ацетон, сернистый ангидрид, окись углерода, двуокись углерода и т.д. [4]. Для медицинской диагностики человека, контроля выдыхаемых им газов медицине остро необходимы датчики  $\text{CO}_2$  ( $4.25 \mu\text{m}$ ) и  $\text{CO}$  ( $4.7 \mu\text{m}$ ).

В работе [5] описаны фотодиоды на основе гетероструктур  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}$  с диаметрами фоточувствительной площадки  $0.3 \text{ mm}$ , работающие при комнатной температуре в среднем ИК диапазоне  $3.5\text{--}4.8 \mu\text{m}$ . Гетероструктуры с активным слоем  $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках  $\text{InAs}$ . Достигнута токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ( $\lambda_{\text{max}} = 4.2\text{--}4.7 \mu\text{m}$ ) величиной  $0.6\text{--}0.8 \text{ A/W}$ , значение плотности обратных темновых токов  $(1.5\text{--}7.5) \cdot 10^{-1} \text{ A/cm}^2$  при напряжении обратного смещения  $0.2 \text{ V}$ . Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигало величины  $700\text{--}800 \Omega$ . Обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности составляла  $(5\text{--}8) \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ . При этом описанные фотодиоды обладают узкой полосой спектральной чувствительности ( $3.5\text{--}4.8 \mu\text{m}$ ) с полушириной спектра  $0.8\text{--}0.9 \mu\text{m}$ , что не удовлетворяет требованиям достаточно большого количества применений. Узкий спектр чувствительности обуславливался наличием тонкого ( $1 \mu\text{m}$ ) подконтактного слоя из арсенида индия. В работе [6] описывается фотодиод на основе гетероструктуры  $\text{InAs}/\text{InAsSb}_{0.08}/\text{InAsSbP}$  с флип-чип конструкцией приемника излучения и засветкой через подложку  $\text{InAs}$ . Используемый в активной области твердый раствор  $\text{InAsSb}$  и освещение через вырожденную подложку позволили получить фотодиод с диапазоном спектральной чувствительности  $2.6\text{--}4.6 \mu\text{m}$  и максимумом в  $3.8\text{--}4.0 \mu\text{m}$ . Высокая токовая монохроматическая чувствительность позволила достигнуть значений обнаружительной способности  $2.8 \cdot 10^9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$  на длине волны  $4.3 \mu\text{m}$ . Длинноволновый фотодиод на основе гетероструктуры  $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAs}$  с флип-чип конструкцией приемника излучения с засветкой через подложку  $\text{InAs}$  продемонстрирован на сайте [7]. Максимум спектральной чувствительности фотодиода приходится здесь на  $4.55 \mu\text{m}$ , а длинноволновая отсечка составляет  $5.1 \mu\text{m}$ . Отметим, что описанные фотодиоды обладали значениями токовой чувствительности  $0.4\text{--}0.6 \text{ A/W}$  и значениями дифференциального сопротивления в нуле смещения

10–15  $\Omega$ . Обнаружительная способность фотодиодов достигала значения  $5 \cdot 10^9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$  на длине волны  $4.55 \mu\text{m}$ . Такой результат обусловлен, в значительной степени, использованием иммерсионной линзы с диаметром  $3.3 \text{ mm}$  и отражательным свойством тыльного контакта. Как и в работе [5], приемник имеет узкий диапазон спектральной чувствительности. Расширение спектрального диапазона чувствительности может быть достигнуто за счет использования более широкозонного „окна“.

В настоящей работе мы сообщаем результаты разработки и исследований, направленных на создание высокоэффективных фотодиодов, работающих при комнатной температуре в среднем ИК диапазоне с расширенной полосой чувствительности  $1.5\text{--}4.8 \mu\text{m}$  и усовершенствованной конструкцией фотодиода как в отношении толщин, последовательности и концентраций активных и ограничительных слоев, так и в отношении омических контактов (геометрии контактов).

Для решения поставленных задач были выращены фотодиодные структуры методом ЖФЭ на подложках  $n\text{-InAs}$  (100). Структуры состояли из подложки  $\text{InAs}$  ( $n \sim 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), на которой последовательно выращивался широкозонный эмиттерный слой  $\text{InAsSbP}$  толщиной  $(4.5\text{--}6.0) \mu\text{m}$ . Далее наращивались активная область  $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  толщиной  $(1.5\text{--}2.2) \mu\text{m}$  и широкозонный эмиттерный слой из твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  толщиной  $(1.5\text{--}2.0) \mu\text{m}$ . Для согласования постоянной решетки между этими слоями и подложкой был выращен слой  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  толщиной  $(3.5\text{--}5.0) \mu\text{m}$ . При выращивании активного слоя  $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  использовался редкоземельный элемент Ho (гольмий), результатом чего стало получение концентрации  $n \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Широкозонный эмиттерный слой  $\text{InAsSpP}$  и слой  $\text{InAsSb}_{0.06}$  были получены  $N$ -типа за счет легирования Sn (оловом) до уровня  $(1\text{--}3) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , при этом широкозонное „окно“  $P\text{-InAsSbP}$  легировалось Mn (марганцем) до концентрации  $P = (2\text{--}5) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Схематическое изображение структуры приведено на рис. 1, *a*. Для контроля выращенной структуры были выполнены измерения на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra-AURA (НТ-МДТ, Зеленоград). Использовались проводящие зонды DCP 11, с характерным радиусом закругления острия  $R = 70 \text{ nm}$ . На рис. 1, *b*, *c* представлены распределение поверхностного потенциала заземленной структуры, полученное методом Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ), и профиль структуры. Измерения проводились в комнатных условиях на поверхности скола



**Рис. 1.** *a* — схематическое изображение структуры  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}/\text{InAsSbP}_{0.30}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}_{0.30}$ , *h* — толщина слоя: *1* —  $n\text{-InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ ,  $h = 5.2 \mu\text{m}$ ; *2* —  $n\text{-InAsSbP}_{0.30}$ ,  $h = 6.0 \mu\text{m}$ ; *3* —  $n\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ ,  $h = 1.8 \mu\text{m}$ ; *4* —  $p\text{-InAsSbP}_{0.30}$ ,  $h = 0.8 \mu\text{m}$ . *b*, *c* — изображение, полученное КЗМ и профиль распределения поверхностного потенциала заземленной структуры. *d* — разностный профиль распределения поверхностных потенциалов обратносмещенной ( $-0.6 \text{ V}$ ) и заземленной структуры.

структуры. Изменение величины поверхностного потенциала связано с различными величинами работ выхода слоев гетероструктуры. Из рисунка следует, что структура содержит 4 слоя (1–4) толщинами  $5.2\text{--}6.0\text{--}1.8\text{--}0.8 \mu\text{m}$  соответственно, что удовлетворительно совпадает с результатами оптических измерений толщин слоев. Для определения положения  $p\text{--}n$ -перехода было измерено распределение поверхностного потенциала при обратном смещении структуры ( $-0.6 \text{ V}$ ). На рис. 1, *d* представлен разностный профиль, который представляет собой разность распределения поверхностных потенциалов заземленной структуры и смещенной. Из рисунка следует, что на границе первого и второго

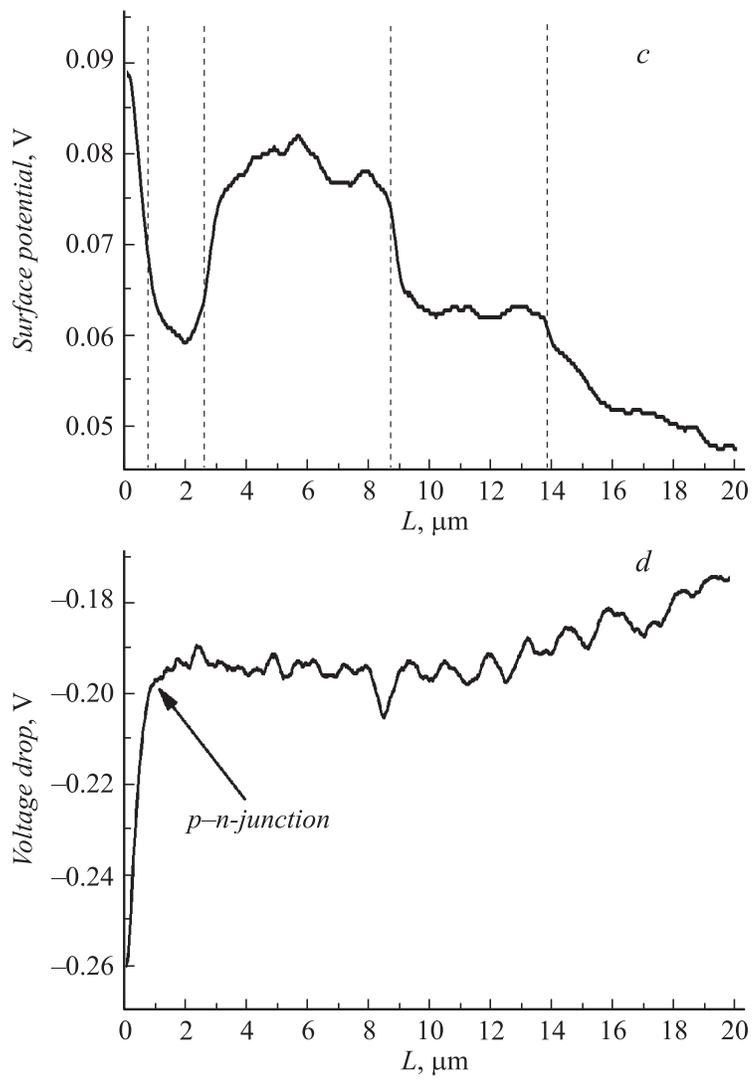
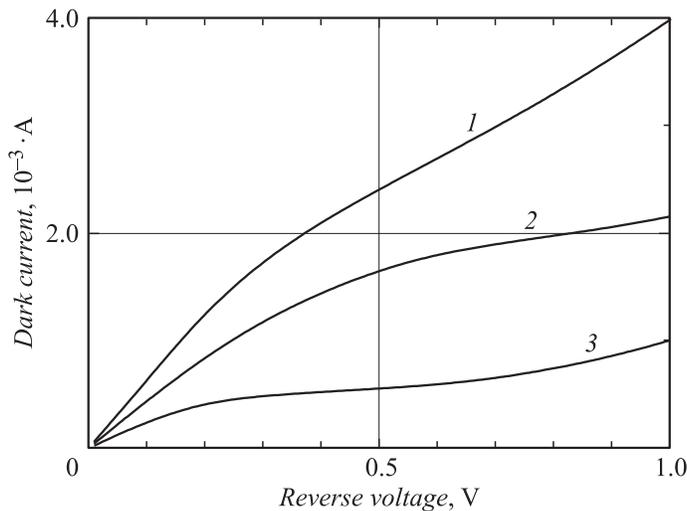


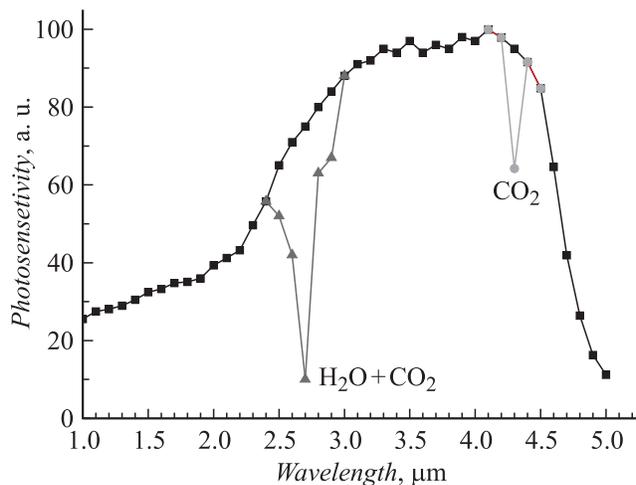
Рис. 1 (продолжение).



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика фотодиодной  $InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP$  структуры при температуре: 1 —  $+20^{\circ}C$ , 2 —  $0^{\circ}C$ , 3 —  $-20^{\circ}C$ .

слоя находится  $p-n$ -переход. Однако на него падает примерно 10% приложенного напряжения, что говорит о его малом сопротивлении и, по-видимому, часть приложенного напряжения падает в объеме полупроводникового материала и на контактах, которые не в полной мере являются омическими в данном эксперименте. Характерные особенности поведения потенциала показывают место (координаты) положения как изотипных гетеропереходов, так и положение  $p-n$ -гетероперехода, что достаточно точно совпадает с нашими исходными данными по толщинам и положениям этих переходов.

Фотодиодные чипы размером  $450 \times 450 \mu m$  были изготовлены методом стандартной фотолитографии с использованием „мокрого“ химического травления. Омический контакт фотоприемника к эпитаксиальному слою создавался методом взрывной фотолитографии и методом вакуумного термического напыления  $Cr-Au-Ni-Au$ . Верхний контакт представляет собой кольцо диаметром  $300 \mu m$  шириной  $15 \mu m$  с дополнительными ответвлениями. Дополнительно с целью увеличения толщины контактного слоя методом электрохимического осаждения наносил-



**Рис. 3.** Спектр фототовета фотодиода  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$  при температуре 300 К.

ся слой золота толщиной  $\sim 2 \mu\text{m}$ . Со стороны подложки наносился сплошной многослойный  $\text{Cr}-\text{Au}-\text{Ni}-\text{Au}$  контакт методом вакуумного термического напыления. После создания контактов структура подвергалась термообработке в среде водорода. Для дальнейших исследований чипы фотодиодов спаивались на корпуса ТО-18 или на керамику и помещались на термохолодильник.

Была собрана и измерена серия фотодиодов, все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки  $\sim 0.1-0.15 \text{ V}$  при  $T = 300 \text{ K}$  и дифференциальным сопротивлением в нуле смещения  $R_0 = 20-100 \Omega$ , значение плотности обратных темновых токов  $1-1.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ , при напряжении обратного смещения  $0.2 \text{ V}$  (см. рис. 2).

Для изучения спектров чувствительности фотодиодов использовался монохроматор SPM2 (Carl Zeiss). Измерения проводились по схеме синхронного детектирования с использованием прибора Stanford Research SR830. На рис. 3 показан спектр распределения фоточувствительности диодов при температуре  $T = 300 \text{ K}$ . Как видно из рисунка, диапазон чувствительности по уровню 30% от максимума лежит между  $1.5 \mu\text{m}$  и  $4.8 \mu\text{m}$ . На спектре присутствуют два „провала“:  $4.25 \mu\text{m}$ , обуслов-

ленный поглощением излучения углекислым газом, и  $\sim 2.7 \mu\text{m}$ , обусловленный поглощением излучения парами воды и углекислым газом. Получено значительное расширение диапазона рабочих длин волн. Для определения токовой чувствительности  $S(\lambda_{\text{max}})$  использовался метод сравнения с калиброванным по чувствительности приемником излучения. Сопротивление  $R_0$  фотодиода в нуле смещения измерялось в диапазоне  $+10 \text{ mV} \dots -10 \text{ mV}$ . Расчет обнаружительной способности  $D^*$  проводился в максимуме спектральной чувствительности по формуле Джонса в предположении, что шумы приемника определяются шумами  $R_0$  [8]:

$$D^* = S(\lambda_{\text{max}})(R_0 A / 4kT)^{1/2},$$

где  $A$  — площадь чувствительной площадки фотодиода,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

При комнатной температуре в максимуме спектральной чувствительности токовая монохроматическая чувствительность составила  $0.6\text{--}0.8 \text{ A/W}$  и была оценена обнаружительная способность, составившая значение  $(1\text{--}2) \cdot 10^8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ .

Таким образом, созданы фотодиоды на основе гетероструктур  $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ , выращенные методом ЖФЭ с фоточувствительной площадкой  $0.45 \times 0.45 \text{ mm}^2$ , работающие при комнатной температуре в расширенном спектральном диапазоне  $1.5\text{--}4.8 \mu\text{m}$ . Дифференциальное сопротивление в нуле смещения составило  $20\text{--}100 \Omega$ , значение плотности обратных темновых токов при этом  $1\text{--}1.5 \text{ A/cm}^2$ , при напряжении смещения  $0.2 \text{ V}$ . В максимуме спектральной чувствительности токовая монохроматическая чувствительность составила  $0.6\text{--}0.8 \text{ A/W}$ , а обнаружительная способность фотодиодов  $D^* = (1\text{--}2) \cdot 10^8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ .

Работа частично поддержана программой Президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ\_а, 10-02-00548\_а.

## Список литературы

- [1] Carter B.L., Shaw E., Olesberg J.T. et al. // Electronics Lett. 2000. V. 36. N 15. P. 1301.
- [2] Mikhailova M., Stoyanov N., Andreev I. et al. // SPIE Proc. 2007. V. 6585. P. 658526-1.

- [3] *Troy T.L., Thennadil S.N.* // J. Biomedical Optics. 2001. V. 6. N 2. P. 167.
- [4] *Hitran.* Web site [http:// www.cfa.harvard.edu/hitran/](http://www.cfa.harvard.edu/hitran/)
- [5] *Шерстнев В.В., Старостенко Д.А., Андреев И.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 1. С. 11–17.
- [6] *Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д.* и др. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 3. С. 412–417.
- [7] *Фотодиод PD45Sc* на сайте [www.mirdog.spb.ru](http://www.mirdog.spb.ru).
- [8] *Jones R.C.* // Advances in Electronics. NY: Academic, 1953. V. 5. P. 1.